

レーザー励起光電子顕微鏡で見る量子液晶の剛性

[1] 要旨

電子状態が液晶のように方向性を持つ量子液晶の1つである鉄系超伝導体の電子ネマティック相では、方向性の強度が実空間で波状になる新奇なドメイン構造が報告された。これは、量子液晶の剛性が高いためにドメイン壁が異常に厚くなるためと考えられている。レーザー励起光電子顕微鏡を用いた電子ネマティック相の観察を複数の物質で行い、それらを比較することから系が通常金属から逸脱する度合いとドメイン壁の厚みがよく対応していることが見出された。これにより、量子液晶の剛性には、異常金属をもたらすスピンや軌道のゆらぎが大きくかかわっていることが示唆される。

[2] 本文

近年、様々な物質において電子状態があたかも液晶のようにふるまう「量子液晶」が注目を集めている。従来の液晶は分子そのものが方向性をもって整列するのにに対し、量子液晶の方向性は物質中の電子がスピンや軌道といった量子力学的な自由度に起因する。こうした量子液晶の1つに、金属の応答が方向性を示す「電子ネマティック相」と呼ばれる状態がある。電子ネマティック相が最も顕著に表れる鉄系超伝導体では、もともと結晶は4回対称性を持つが、ネマティック相では電子系は2回対称となる。このとき、エネルギー的に等価な方向が2つあることによって、実空間では複数の異方性（長方形）が共存する状態（ドメイン構造）が出現する。このようなドメインの構造は強磁性体などでもよく観察されており、その電子状態を理解する重要な情報となる。鉄系超伝導体の電子ネマティック相では、2つの隣り合うドメイン構造の境界があいまいになり、ドメインの割合が波長 500 nm 程度の正弦波のようにふるまう **mesoscopic nematicity wave (MNW)** と呼ばれる新奇な現象が観察されている。観測されたドメイン構造は、報告されている結晶のドメイン構造とは大きく異なるため、結晶とは独立した電子の波であることが示唆されている。これは既存の理論で説明できない量子液晶の性質であり、その起源の解明に興味もたれる。MNW は、あるドメインが別のドメインに変化するために必要な長さである「ドメイン壁の厚み」が非常に長いことで理解できる可能性がある。これは、ドメインが別のドメインに変化しづらいことを意味しており、ドメイン壁の厚みは電子ネマティック相の「剛性」を表す尺度と捉えられる。すなわち、ドメイン壁が厚い MNW では、量子液晶が非常に高い剛性を持っているといえる。しかし、その高い剛性の起源は解明されていなかった。

今回、東京大学大学院新領域創成科学研究科、東京大学物性研究所、産業技術総合研究所の研究グループは、レーザー励起光電子顕微鏡（レーザーPEEM）を用いて鉄系超伝導体 BaFe_2As_2 と $\text{FeSe}_{0.9}\text{S}_{0.1}$ にてドメイン観察を行い、先行研究で MNW が見られた FeSe や $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.87}\text{P}_{0.13})_2$ と共にドメイン壁の厚み（剛性）を比較した。その結果、ドメイン壁の厚みは物質により大きく異なり、それが電気抵抗率の温度依存性と関連していることが明らかとなった。鉄系超伝導体では、通常の金属状態から逸脱する「異常金属」の振舞いがしばしばみられる。この異常金属の振舞いは、スピンや軌道の「ゆらぎ」によって生じると考えられている。今回の結果は、ゆらぎが大きいほど電子ネマティック相の剛性が高いことを示唆するものであり、量子液晶の起源を解明する上で重要な情報となることが期待される。この成果は JPSJ の 2024 年 10 月号に掲載された。

本実験で用いたレーザーPEEMは、光電効果によって放出された光電子の位置情報を実空間でマ

ッピングする顕微鏡である。レーザーPEEMは、左右の直線偏光によって光電子強度が異なる性質である線二色性の非対称度を実空間でマッピングすることで、電子状態に生じる回転対称性の破れをナノメートルスケールの分解能で観察できる。本研究では、まずレーザーPEEMを用いて $\text{FeSe}_{0.9}\text{S}_{0.1}$ と BaFe_2As_2 の電子ネマティックドメインの観察を行い、ドメイン壁の厚みを測定した(図1(a),(b))。その結果、 BaFe_2As_2 と $\text{FeSe}_{0.9}\text{S}_{0.1}$ でドメイン壁の厚みが3倍以上異なることが判明した。次に、このドメイン壁の違いの起源を調べるため、電気抵抗率の温度依存性との比較を行った。通常の金属では電気抵抗率は温度の2乗に比例するが、スピンゆらぎが強い系などの異常金属では温度の1乗に比例する場合がある。よって、電気抵抗率を $\rho = \rho_0 + AT^n$ でフィッティングしたとき、温度のべき n がどれだけ2より1に近いかで、通常金属から逸脱している度合いを見積もることができる。電子ネマティック相転移温度より高温の電気抵抗率における n とドメイン壁の厚みの比較の結果、通常の金属状態から逸脱するにつれて、ドメイン壁の厚みが増していくことがわかった(図1(c))。この結果、電子ネマティック相の剛性が異常金属の起源となるスピンや軌道のゆらぎによって大きく変化することが示唆される。量子液晶の剛性という観点は、今まであまり注目されていなかったため、本研究成果は電子ネマティック相の解釈に一石を投じるものである。今後、本研究成果を説明できる量子液晶の新理論の登場や、量子液晶を示す他物質への研究展開が期待される。

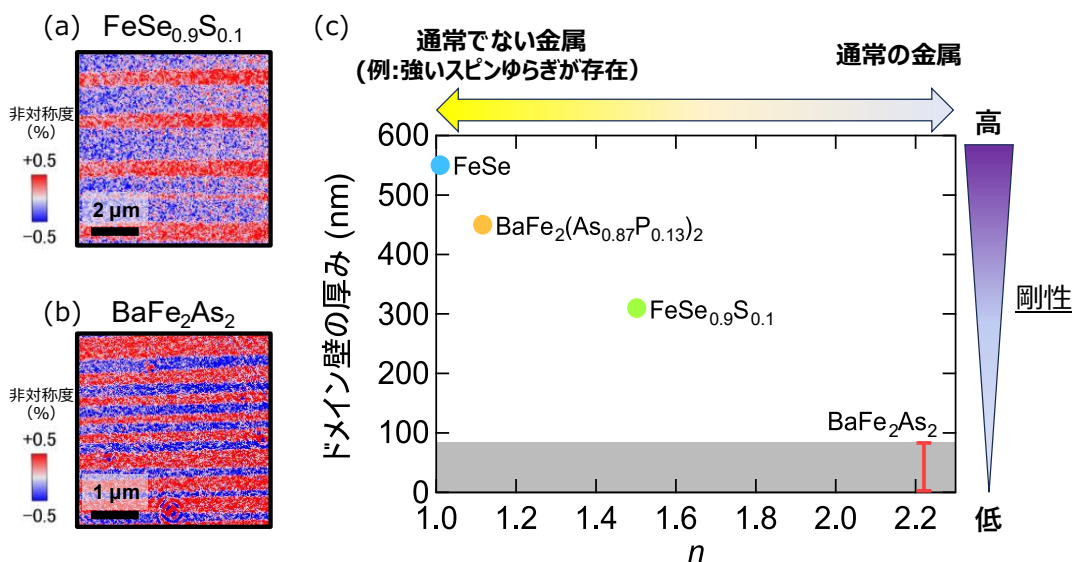


図 1. (a) $\text{FeSe}_{0.9}\text{S}_{0.1}$, (b) BaFe_2As_2 における電子ネマティック相のドメイン構造の観察結果。(c)電気抵抗の温度依存性を温度のべき乗でフィッティングした場合のべき n とドメイン壁の厚みの比較。

原論文 (2024 年 9 月 11 日公開済)

Coherence Length of Electronic Nematicity in Iron-Based Superconductors

Y. Kageyama, A. Onishi, C. Bareille, K. Ishida, Y. Mizukami, S. Ishida, H. Eisaki, K. Hashimoto, T. Taniuchi, S. Shin, H. Kontani, and T. Shibauchi, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 103702 (2024).

< 情報提供 : 影山遥一 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)
芝内孝禎 (東京大学大学院新領域創成科学研究科) >